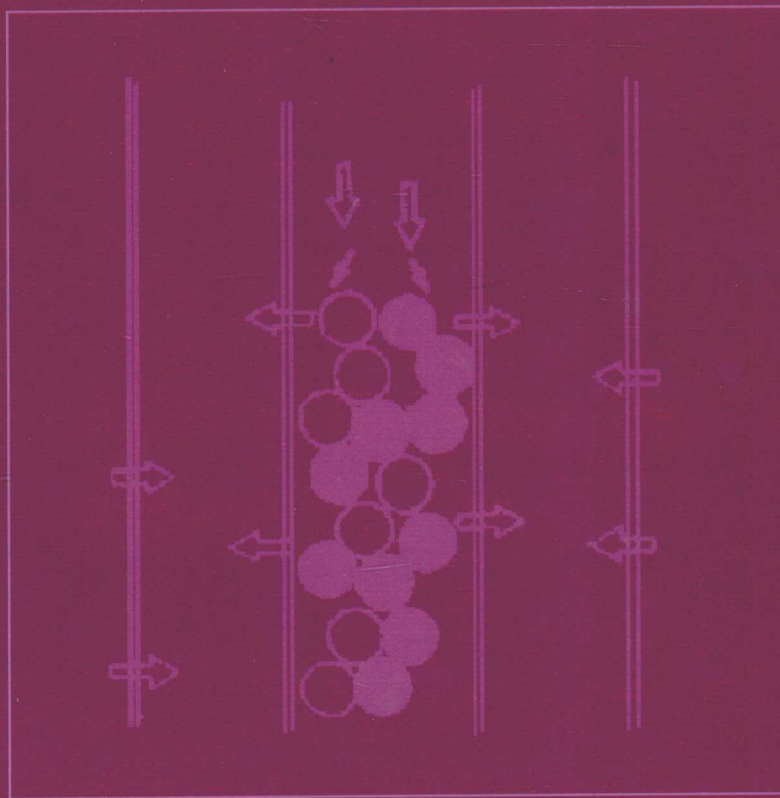


现代离子交换与吸附技术

王方 主编



清华大学出版社



现代离子交换与吸附技术

王方 主编



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书介绍近年来吸附分离功能高分子材料涉及的离子交换与吸附技术的发展情况,力求体现技术的前瞻性和实用性。全书分14章,分别介绍离子交换树脂、膜和纤维,以及吸附树脂、活性炭等新型功能吸附分离材料的性能、制备和应用。这些技术和新材料的重点应用领域有水处理、环保、电力、核工业及冶金等。

本书可供吸附分离功能高分子材料研制和应用等相关领域的科研人员及大专院校师生阅读参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

现代离子交换与吸附技术/王方主编.--北京:清华大学出版社,2015

ISBN 978-7-302-40440-8

I. ①现… II. ①王… III. ①离子交换—研究 ②离子吸附—研究 IV. ①O658.6 ②O646.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第123159号

责任编辑:黎强

封面设计:常雪影

责任校对:刘玉霞

责任印制:沈露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座

邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印装者:三河市中晟雅豪印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:49.25 字 数:1136千字

版 次:2015年11月第1版

印 次:2015年11月第1次印刷

定 价:168.00元

产品编号:035778-01

各章作者

- 第 1 章 王广珠 庞胜林
第 2 章 朱兴宝
第 3 章 葛道才
第 4 章 王 方 王明亚
第 5 章 陈水挟 李统一
第 6 章 张 静 张政朴
第 7 章 陈水挟 黎海超 李启汉
第 8 章 丁桓如
第 9 章 田文华 韩隶传
第 10 章 王槐三
第 11 章 李彦峰 张 云 李晓丽
第 12 章 龚柏凡 温俊杰
第 13 章 朱志平
第 14 章 江邦和 寇正福 徐环昕

序

离子交换与吸附现象是普遍存在于自然界中的一种物质运动形式,离子交换与吸附技术是继精馏、萃取等典型化工过程之后兴起的一项新型化工分离技术。它是一种高效提取、浓缩和精制的重要化工分离手段和方法。离子交换与吸附树脂是一类新型功能高分子材料,它是进行离子交换与吸附分离操作过程的物质基础。有机离子交换树脂 1945 年在欧美首先问世以来,经历了 70 年的发展历程,最早在西方发达国家投入工业生产,现已广泛应用于化工、轻工、食品、医药、水处理、环境保护、湿法冶金和原子能工业等领域。

新中国成立后,我国离子交换树脂及其应用技术才开始起步,1956 年何炳林先生冲破美国政府重重阻挠,回到祖国到南开大学任教,为我国离子交换与吸附技术的发展及国防工业作出了重大贡献。1982 年由国际离子交换树脂领域著名教授 F. G. Helfferich 任主编的学术刊物 *Reactive Polymers (ion exchanger, sorbents)*,以及 1984 年由何炳林院士任主编的《离子交换与吸附》相继创刊并延续至今,给工作在反应性高分子研究领域的科学工作者提供了学术交流的平台,更好地促进了高分子学科和该项技术的发展。

近 60 年来,南开大学、南京大学、中山大学、四川大学、武汉大学、兰州大学、华东理工大学和清华大学等高校以及中科院有关院、所的许多科研人员选择离子交换与吸附技术作为研究方向,取得了丰硕的科技成果,培养了一大批从事该项技术研究、开发与应用的优秀人才。我国离子交换与吸附技术得到迅猛发展,并在工业废水处理、有机合成催化、稀有金属提炼、中草药与抗生素提取和人体血液灌流等方面取得了国际领先水平的科研成果。目前国内已有 20 多家企业生产离子交换树脂和吸附树脂,年产量达 20 多万 t,约占世界产量的 50%,我国已成为世界最大的树脂生产与应用大国,并有部分产品畅销国外。

自改革开放以来,我国编撰出版的离子交换与吸附学科领域的科技书有:1984 年,钱庭宝编著的《离子交换剂应用技术》;1990 年,钱庭宝、刘维琳和李金和编写的《吸附树脂及其应用》;1992 年,姜志新、谌竞清、宋正孝编著的《离子交换分离工程》;1995 年,何炳林和黄文强主编的《离子交换与吸附树脂》;2000 年,王方主编、凌达仁与黄文强为副主编的《国际通用离子交换技术手册》;2003 年,王方编著的《离子交换树脂标准手册》等。

这些著作的出版受到了科技界的欢迎和赞许,有力地推动了我国离子交换与吸附技术的发展。

本书重点介绍了我国在过去 30 多年里在离子交换与吸附技术方面的新发展,具有以下两个特点:

(1) 涵盖技术范围广、应用面宽。本书内容丰富、信息量大,技术内容涉及石化工业、轻工业、食品工业、医药工业、冶金工业、原子能工业、电力工业和环境保护,涉及国民经济

及人民生活的各个方面。

(2)实用性强、可读性好。文字深入浅出、图文并茂,既有理论分析,又有实例说明,并有大量的参考文献和专利技术介绍。

因此,这是一本理论联系实际、技术含量较高的优秀科技书籍,将在建设“创新国家”和“美丽中国”的征程中发挥重要作用,对在该领域工作与学习的广大的高校师生和工程技术人员有很好的学习与参考价值,必将促进本领域创新思维的启迪和创新能力的培养,并进一步推动我国离子交换与吸附技术在 21 世纪的蓬勃发展。

在此谨向为编撰该书付出辛勤劳动的全体作者表示热烈的祝贺和衷心的感谢!由于种种原因与条件所限,本书在涉及树脂合成、结构与性能、作用原理等应用基础研究,以及树脂在催化、生物化学、化学分析和医药学等方面的最新研究成果还着墨不多,有待今后不断总结、补充发展。

在本书出版之际,我们深深缅怀中国离子交换与吸附技术的奠基人、已故中国科学院院士何炳林先生。该书的出版无疑是对他最好的纪念和告慰,由他开创的事业将继续往开来、后继有人。

中国工程院院士、南京大学教授

张全兴

2015年6月19日于南京

前言

20 世纪末,作者协同江苏石油化工大学凌达仁教授、南开大学黄文强教授等从事诸多学科的离子交换技术的专家和学者编撰了《国际通用离子交换技术手册》一书,全书分离子交换理论、材料、应用和文献四个部分,共 24 章。该手册不但内容完整,而且具有技术的新颖性及权威性,成为一本名副其实的离子交换技术的百科全书。

我们要深深地感谢离子交换技术领域著名的德国专家 K. Dorfner(*Ion Exchangers* 的主编),是他提供大量资料,为我们编撰该手册奠定了扎实的基础;是他聘请了 33 位国外著名专家和学者,把他们毕生的研究成果为大家所共享。

21 世纪初,这本近 200 万字巨著的出版得到广大读者的欢迎,该手册很快被抢购一空。几次拟将原手册再版发行,都因难以解决版权问题而未成功。近年来,随着我国国民经济的飞跃发展,离子交换技术也得到长足进步。我们萌发了由我国离子交换方面的专家和学者独自编撰离子交换专著的构想。这一提议得到中国工程院院士、南京大学张全兴教授及《离子交换与吸附》编辑部的支持,也得到中国化学会第 14~16 届反应性高分子学术研讨会与会代表的响应。从 2009 年起,开始着手编撰本书。

本书由清华大学王方负责组稿、初审和统稿,多位专家参与编写,具体分工为:西安热工研究院有限公司王广珠和华能玉环电厂庞胜林(第 1 章);湖北省电力科学研究院朱兴宝(第 2 章);核工业北京化工冶金研究院葛道才(第 3 章);清华大学王方和苏州华清水处理技术有限公司王明亚(第 4 章);中山大学陈水挾和李统一(第 5 章);南开大学张静和张政朴(第 6 章);中山大学陈水挾、黎海超和李启汉(第 7 章);上海电力学院丁桓如(第 8 章);西安热工研究院有限公司田文华和韩隶传(第 9 章);四川大学王槐三(第 10 章);兰州大学李彦峰、张云和李晓丽(第 11 章);中南大学龚柏凡和永清环保股份有限公司温俊杰(第 12 章);长沙理工大学朱志平(第 13 章);华东理工大学江邦和、寇正福和徐环昕(第 14 章)。全部书稿由张全兴院士终审,并作序。

全书分 14 章,从离子交换树脂使用和诊断技术开始论述,接着讨论离子交换树脂的污染、再生、报废及再利用,其后论述离子交换膜及其应用,再介绍由离子交换膜和树脂为主要材料制成的电去离子净水装置及各种应用;第 5~7 章论述离子交换和活性炭纤维的制备及其应用;第 8~11 章是离子交换树脂及吸附材料在水处理,包括工业废水和火力发电厂凝结水等处理方面的应用;第 12 章和第 13 章是离子交换技术在冶金和核工业上的应用;第 14 章是新型分离介质的制备及其应用。

上述各章的编撰者都是长期从事离子交换与吸附技术研究的专家和学者,也有各新兴分支领域的开拓者,他们熟悉本分支领域的内容,把这个分支的现状和进展,以编撰者最擅长的方式表达出来。由于种种原因,全书的内容有所欠缺。好在近年来有一些优秀

的相关著作出版,如王佳兴等人的《生化分离介质的制备与应用》、史作清等人的《吸附树脂在制药工业上的应用》和顾觉奋的《离子交换与吸附树脂在制药工业上的应用》等,可弥补不足。有兴趣的读者,可阅读这些著作,吸取所需营养。

为了方便读者查找,本书附录给出了我国现行离子交换树脂国家标准和行业标准名录,供读者查阅使用。这些标准中,有国家标准 19 项、化工行业标准 7 项和电力行业标准 8 项。

本书的出版得到上海华震科技有限公司、西安蓝晓科技新材料股份有限公司和扬州金珠树脂有限公司等单位的支持,特此致谢。

由于作者水平有限,书中的缺点和不妥之处在所难免,恳请广大读者不吝赐教指正。

王 方

2014 年 6 月于清华园

目录

第 1 章 离子交换树脂的性能及使用寿命	1
1.1 离子交换树脂分类及命名	1
1.1.1 离子交换树脂分类	1
1.1.2 离子交换树脂命名法则及型号	2
1.2 离子交换树脂结构概述	4
1.2.1 化学结构	4
1.2.2 物理结构	5
1.3 离子交换树脂的物理性能	5
1.3.1 离子交换树脂外观	5
1.3.2 离子交换树脂的水溶性浸出物	6
1.3.3 离子交换树脂的含水量	7
1.3.4 离子交换树脂的密度	8
1.3.5 离子交换树脂的粒度和粒度分布	10
1.3.6 离子交换树脂的机械性能	11
1.3.7 离子交换树脂的不可逆膨胀和转型膨胀	17
1.3.8 离子交换树脂的耐热性与抗氧化性	20
1.3.9 离子交换树脂孔结构	22
1.4 离子交换树脂的化学性能	26
1.4.1 离子交换树脂的交换容量	26
1.4.2 阳离子交换树脂交换容量	27
1.4.3 阴离子交换树脂交换容量	29
1.4.4 离子交换树脂的酸碱性	33
1.4.5 离子交换平衡和选择性	36
1.4.6 离子交换树脂的交换特性	38
1.4.7 离子交换速度	41
1.5 离子交换树脂的工艺性能	43
1.5.1 工作交换容量	43
1.5.2 再生剂耗与比耗	45
1.5.3 自用水率	47
1.6 离子交换树脂的使用方法	48
1.6.1 运输和存放	48

1.6.2	使用中可能出现的问题	50
1.6.3	停运	52
1.6.4	定期检查	52
1.6.5	离子交换树脂的补充	54
1.6.6	离子交换树脂的分离	54
1.6.7	离子交换树脂的鉴别	55
1.7	常用离子交换树脂的理化性能指标	55
1.8	离子交换设备运行中出现的问题及判断方法	63
1.8.1	出水水质恶化	64
1.8.2	设备出力降低	64
1.8.3	运行经济指标降低	65
1.9	常见的水处理用离子交换树脂的劣化现象	65
1.9.1	离子交换树脂的破损	65
1.9.2	离子交换树脂的铁污染	66
1.9.3	离子交换树脂的氧化和降解	67
1.9.4	凝胶型强碱性阴离子交换树脂的有机物污染	69
1.10	离子交换树脂的基本理化性能劣化与工艺性能变化的关系	69
1.10.1	001×7 强酸性阳离子交换树脂理化性能劣化与工作交换 容量的关系	69
1.10.2	201×7 强碱性阴离子交换树脂理化性能劣化与工作交换 容量的关系	74
1.11	离子交换树脂使用寿命的判断	78
1.11.1	离子交换树脂使用的安全寿命指标	78
1.11.2	离子交换树脂使用的经济寿命指标	79
1.12	离子交换树脂的报废与更换规则	81
1.12.1	离子交换器内树脂的取样方法	81
1.12.2	离子交换树脂样品的分析	82
1.12.3	001×7 强酸性阳离子交换树脂的更换与报废	82
1.12.4	201×7 强碱性阴离子交换树脂的更换与报废	83
	参考文献	84
第 2 章	离子交换树脂的污染、复苏、报废与再利用	85
2.1	离子交换树脂的特性与应用	85
2.1.1	离子交换树脂的特性	85
2.1.2	离子交换树脂的应用、组合及其污染源	86
2.2	强酸性阳离子交换树脂的污染	87
2.2.1	悬浮物污染	87
2.2.2	高价阳离子污染	87

2.2.3	热的污染	89
2.2.4	有机物污染	89
2.2.5	氧化剂污染	90
2.2.6	CaSO ₄ 污染	91
2.3	强碱性阴离子交换树脂的污染	92
2.3.1	悬浮物污染	92
2.3.2	高价阳离子污染	92
2.3.3	强碱性阴离子交换树脂的钠离子的污染	94
2.3.4	热的污染	101
2.3.5	有机物污染	101
2.3.6	微生物污染	121
2.3.7	硅化合物的污染	128
2.3.8	氧化剂的污染	131
2.4	脱盐系统混床用离子交换树脂的污染	132
2.4.1	脱盐系统混床用离子交换树脂的污染源	132
2.4.2	脱盐系统混床用离子交换树脂被有机物污染后的危害	132
2.4.3	脱盐系统混床用离子交换树脂被有机物污染的机理	135
2.4.4	混床用强碱性阴离子交换树脂被有机物污染后的复苏	138
2.4.5	混床用强碱性阴离子交换树脂被有机物污染的预防	138
2.5	凝结水处理用离子交换树脂的污染	138
2.5.1	铁氧化物和悬浮物的污染	138
2.5.2	热的污染	140
2.5.3	离子交换树脂溶出物的污染	145
2.5.4	炉内添加的化学药品的污染	147
2.6	离子交换树脂污染的测定	148
2.6.1	离子交换树脂铁污染的测定	148
2.6.2	离子交换树脂有机物污染的测定	148
2.6.3	阴离子交换树脂有机物污染的简易测定	149
2.7	离子交换树脂污染后的报废标准	150
2.7.1	阳离子交换树脂污染后的报废标准	150
2.7.2	阴离子交换树脂污染后的报废标准	151
2.8	离子交换树脂报废后的再利用	152
2.8.1	阳离子交换树脂报废后的再利用	152
2.8.2	阴离子交换树脂报废后的再利用	153
	参考文献	153
第3章 离子交换膜及其应用		155
3.1	概述	155

3.2	离子交换膜的定义	156
3.3	离子交换膜的化学结构	160
3.4	离子交换膜的分类	160
3.4.1	异相离子交换膜	161
3.4.2	半均相离子交换膜	161
3.4.3	均相离子交换膜	161
3.4.4	阳离子交换膜	161
3.4.5	阴离子交换膜	161
3.4.6	特种功能离子交换膜	161
3.5	离子交换膜的制造方法	162
3.5.1	异相阴、阳膜的制造	162
3.5.2	均相离子交换膜的制造方法	163
3.5.3	半均相阴、阳膜的制造	169
3.5.4	全氟磺酸膜、全氟羧酸膜及其复合膜的制法简介	171
3.5.5	双极膜的制造	173
3.5.6	一价离子选择透过性膜的制造	174
3.6	离子交换膜的性能	175
3.6.1	概述	175
3.6.2	离子交换膜的性能测定	176
3.7	离子交换膜的应用	184
3.7.1	电渗析	184
3.7.2	填充床电渗析处理放射性废水和制备高纯水及超纯水	206
3.7.3	离子交换膜的扩散渗析	207
3.7.4	隔膜电解	209
3.8	展望	217
	参考文献	219
第 4 章	电去离子净水技术	221
4.1	电去离子过程的反应叠加的实用模型	221
4.1.1	反应叠加的实用模型	221
4.1.2	模型应用讨论	223
4.2	制备纯水用电去离子装置	226
4.2.1	薄室 EDI 装置	226
4.2.2	厚室 EDI 装置	226
4.2.3	新型结构的 EDI 装置	227
4.3	离子交换树脂的绿色电再生工艺	229
4.3.1	EDI 净水设备中离子交换树脂的电再生	230
4.3.2	混床离子交换树脂电再生	230

4.3.3	复床离子交换树脂电再生	232
4.3.4	离子交换树脂电再生法与化学再生法的对比评价	232
4.4	混床离子交换树脂电再生过程解析	234
4.4.1	电再生方式	234
4.4.2	电再生曲线	236
4.4.3	电再生机理	238
4.4.4	电再生应用	238
4.5	电去离子软水技术	239
4.5.1	工作原理	240
4.5.2	技术特点	242
4.5.3	工业试验研究	243
4.5.4	应用领域	246
4.6	印刷电路板行业废水回用处理工艺	248
4.6.1	废水回用处理系统	248
4.6.2	特点	250
4.6.3	处理工艺	250
4.7	回收重金属废水用电去离子技术	252
4.7.1	回收含铜废水	253
4.7.2	回收含镍废水	253
4.7.3	回收重金属废水	254
4.8	治理硝酸铵废水的深度处理技术	257
4.8.1	概述	257
4.8.2	工业试验研究	258
4.8.3	工程实例	261
	参考文献	264
第 5 章	离子交换纤维及其应用	267
5.1	离子交换纤维的历史与发展现状	267
5.2	离子交换纤维的制备	268
5.2.1	离子交换纤维的合成	269
5.2.2	制备离子交换纤维的主要材料	271
5.2.3	离子交换纤维的生产设备	274
5.3	离子交换纤维物理化学性能与表征	275
5.3.1	IEF 材料的化学结构表征	275
5.3.2	离子交换纤维的物理性能与表征	275
5.4	离子交换纤维的应用	279
5.4.1	废气处理和空气净化	279
5.4.2	废水处理和高纯水制备	281

5.4.3	稀土元素分离	283
5.4.4	金属离子的富集回收	283
5.4.5	催化剂	284
5.4.6	在生化工程中的应用	284
5.4.7	在医用纺织品中的应用	285
5.4.8	其他应用	285
	参考文献	286
第 6 章	γ 射线辐照接枝制备离子交换纤维材料及其应用	291
6.1	PTFE 纤维辐照接枝制备弱酸性 IEF 及其应用	292
6.1.1	概述	292
6.1.2	PTFE 纤维接枝丙烯酸的合成与表征	293
6.1.3	接枝丙烯酸 PTFE 纤维在离子交换方面的应用	295
6.1.4	接枝丙烯酸 PTFE 纤维在现代分析方法中的应用	303
6.1.5	PTFE 纤维接枝顺丁烯二酸的合成与表征	307
6.1.6	接枝顺丁烯二酸 PTFE 纤维在现代分析中的应用	308
6.1.7	小结	309
6.2	PTFE 纤维辐照接枝制备强酸性 IEF 及其应用	310
6.2.1	PTFE 纤维接枝苯乙烯的合成与表征	310
6.2.2	接枝苯乙烯 PTFE 纤维的磺化与表征	316
6.2.3	强酸性 IEF 对酯化反应的催化	322
6.2.4	小结	331
6.3	PTFE 纤维辐照接枝甲基丙烯酸缩水甘油酯及其应用	331
6.3.1	PTFE-GMA-PEI 纤维的制备	331
6.3.2	PTFE-GMA 及 PTFE-GMA-PEI 纤维的表征	334
6.3.3	PTFE-GMA-PEI 纤维对胆红素的吸附性能	337
6.3.4	PTFE-GMA-PEI 纤维对重金属离子的吸附性能	342
6.3.5	PTFE-GMA-PEI 纤维用于测定中成药中痕量 Pb、Cd	347
6.3.6	PTFE-GMA-PEI 纤维用于测定痕量 Cr(VI)和 Cr(III)	352
6.3.7	小结	356
6.4	聚丙烯纤维接枝制备伯胺基 IEF 及其应用	356
6.4.1	聚丙烯纤维接枝丙烯酰胺的合成与表征	357
6.4.2	PP-VAm 纤维对硫酸链霉素的吸附	363
6.5	聚丙烯纤维接枝制备强碱性 IEF 及其应用	366
6.5.1	强碱性 IEF PP-Vam-ETA 的制备与表征	367
6.5.2	强碱性 IEF PP-Vam-DAC 的制备与表征	371
6.5.3	强碱性 IEF 对硝酸盐氮的吸附	374
	参考文献	377

第 7 章 活性炭纤维及其应用	380
7.1 ACF 的发展历史	380
7.2 ACF 的分类和制备工艺	381
7.2.1 ACF 的分类	381
7.2.2 ACF 的制备工艺	383
7.3 ACF 的结构	389
7.3.1 晶体结构.....	389
7.3.2 表面化学性质.....	390
7.3.3 孔隙结构.....	393
7.4 ACF 的性能	394
7.4.1 ACF 的吸附特性	394
7.4.2 ACF 的氧化还原特性	396
7.4.3 ACF 的其他特性	398
7.5 ACF 的应用	398
7.5.1 ACF 在气相吸附分离方面的应用	398
7.5.2 ACF 在液相吸附分离方面的应用	401
7.5.3 ACF 在能源方面的应用	403
7.5.4 ACF 在催化方面的应用	406
7.5.5 ACF 在其他方面的应用	406
7.6 活性炭及 ACF 的表面改性进展	406
7.6.1 酸性改性.....	408
7.6.2 碱性活性炭.....	412
7.6.3 负载催化剂改性.....	413
7.6.4 负载催化剂的方法.....	413
7.6.5 几种常见活性炭负载催化剂的应用.....	414
参考文献.....	415
第 8 章 活性炭和大孔吸附树脂对水中有机物的吸附技术	428
8.1 活性炭吸附处理中的一般问题	428
8.1.1 活性炭概况.....	428
8.1.2 活性炭结构.....	429
8.1.3 活性炭型号命名.....	431
8.1.4 活性炭理化性能指标.....	432
8.1.5 粒状活性炭过滤吸附.....	433
8.1.6 吸附水中有机物的粉状活性炭处理.....	435
8.1.7 生物活性炭.....	436
8.1.8 活性炭纤维.....	437

8.2	大孔吸附树脂及其吸附性能	439
8.2.1	苯乙烯系大孔吸附树脂(DX-906)吸附性能	439
8.2.2	丙烯酸系大孔吸附树脂(SD500)吸附性能	442
8.3	工业给水处理中的活性炭种类选择问题	447
8.3.1	活性炭国标存在问题及新的筛选方法提出	447
8.3.2	新的标准制定(DL/T 582—2004)	452
8.3.3	其他筛选水处理用活性炭方法及评述	454
8.3.4	选用活性炭的焦糖脱色率方法	458
	参考文献	465
第9章	凝结水精处理离子交换技术	467
9.1	凝结水精处理概述	467
9.1.1	基本概念	467
9.1.2	目的和意义	468
9.1.3	发展历程和现状	470
9.2	凝结水精处理工艺	471
9.2.1	进、出水水质标准	471
9.2.2	系统	474
9.2.3	工艺	475
9.3	凝结水精处理的前置处理	476
9.3.1	概述	476
9.3.2	粉末树脂过滤器	477
9.3.3	管式过滤器	481
9.3.4	前置氢离子交换器	483
9.4	凝结水精处理脱盐工艺	486
9.4.1	混床	486
9.4.2	单床串联系统	497
9.4.3	树脂体外分离和再生	500
9.5	空冷凝结水精处理技术	503
9.5.1	发展现状	503
9.5.2	特点	507
9.5.3	系统的优化配置	508
	参考文献	509
第10章	工业废水治理领域中的应用	511
10.1	我国水环境污染现状	511
10.2	重金属废水的来源、污染现状、危害和治理	513
10.2.1	来源	513

10.2.2	污染现状	513
10.2.3	危害	514
10.2.4	治理实例	515
10.3	树脂吸附法处理染料、农药及其中间体等生产废水与资源化	522
10.3.1	概述	522
10.3.2	树脂吸附法资源化治理实例	527
10.3.3	树脂吸附资源化处理	535
10.4	树脂吸附处理医药及其中间体生产废水与资源化	542
10.4.1	树脂吸附资源化治理实例	542
10.4.2	树脂吸附资源化处理研究	546
10.5	大孔吸附树脂在环境保护领域的其他应用	550
10.5.1	煤气和炼焦废水的治理	550
10.5.2	大孔吸附树脂对低浓度高水溶性有机物的吸附性能	551
10.5.3	吸附树脂对黄原酸盐法人造丝车间空气中 CS ₂ 的模拟吸附	554
	参考文献	555
第 11 章	复合吸附材料及其在污水处理中的应用	558
11.1	概述	558
11.1.1	分类及发展	558
11.1.2	制备与合成设计	565
11.1.3	结构表征与性能测试	567
11.1.4	应用性能的影响因素	569
11.2	合成高分子复合吸附材料及其应用	571
11.2.1	有机/有机复合吸附剂	571
11.2.2	分子(离子)印迹聚合物吸附材料	572
11.2.3	有机/有机复合吸附剂去除废水中氰化物	573
11.3	合成高分子/无机复合吸附材料及其应用	574
11.3.1	合成高分子/无机复合吸附剂的合成设计	574
11.3.2	合成高分子/无机复合吸附材料的结构与性能	577
11.3.3	合成高分子/无机复合吸附剂对水体中污染物的去除	588
11.4	天然高分子/无机复合材料及其应用	595
11.4.1	天然高分子简介	595
11.4.2	天然高分子/无机复合型吸附材料制备方法	599
11.4.3	复合型天然高分子吸附材料的应用	612
11.5	无机基杂化吸附材料及其应用	618
11.5.1	纳米无机杂化吸附剂的合成	618
11.5.2	纳米微球形无机杂化吸附剂的结构与性能	623
11.5.3	纳米无机吸附材料对水中重金属离子与有机物的去除	626
	参考文献	629